

水泥基渗透结晶型防水自修复混凝土在超高层建筑 地下工程中的应用^{*}

王晓冬,贾东,刘强斌,张志超,傅强

(中建五局华南建设有限公司,广东 深圳 518000)

[摘要]深超总C塔项目地下室为3层加地下1层夹层,最深为19.5m,东侧和南侧相邻地铁。为降低地下室外墙渗漏,采用水泥基渗透结晶型防水自修复混凝土。介绍了水泥基渗透结晶型防水材料的自修复特点及应用流程,并对外墙裂缝的愈合情况进行了现场监测与分析,对防水自修复混凝土的应用效果进行评价和总结。

[关键词]高层建筑;地下工程;防水;自修复

[中图分类号] TU755

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0075-04

Application of Cement-based Permeable Crystalline Waterproof Self-healing Concrete in Underground Engineering of Super High-rise Building

WANG Xiaodong, JIA Dong, LIU Qiangbin, ZHANG Zhichao, FU Qiang

(China Construction Fifth Division Southern Construction Subsidiary Co., Ltd.,
Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: The basement of the Shenzhen Super Headquarters Base C Tower project consists of three floors plus one mezzanine, with a maximum depth of 19.5m. Its eastern and southern sides are adjacent to subway lines. To mitigate leakage risks in the basement exterior walls, cement-based permeable crystalline waterproof self-healing concrete was adopted. This paper outlines the self-healing characteristics and application procedures of capillary waterproofing materials, and evaluates the effectiveness of the self-healing concrete through on-site monitoring and analysis of crack repair in the exterior walls.

Keywords:tall buildings;underground engineering;waterproofing;self-healing

0 引言

随着高层建筑地下室深度与规模的不断增加,其混凝土结构的防水性能与耐久性面临严峻挑战^[1-3]。针对地下室混凝土的开裂问题,必须采取修复措施。目前,混凝土自修复技术的研究方向主要包括微生物法、微胶囊法以及渗透结晶法等^[4-6]。渗透结晶法相比于其他自修复技术,修复能力及抗渗性能较高,具有施工方便以及绿色环保等优点^[7-8]。

目前,许多学者对水泥基渗透结晶型防水材料

开展研究,包括对其力学性能、修复机理、耐久性、影响因素、复掺纳米材料^[9-14]等的研究。上述研究均基于室内试验研究的方法,缺少在真实施工环境下水泥基渗透结晶型防水材料的应用及裂缝愈合情况分析。本文结合某地下室防水自修复混凝土的工程应用,通过分析裂隙愈合情况,对水泥基渗透结晶型防水自修复混凝土的应用进行总结。

1 工程概况

深圳湾超级总部基地(简称“深超总”)C塔项目是片区深湾都市核心超高层地标之一(见图1)。项目总用地面积3.63万m²,总建筑面积约54.81万m²,包含1栋72层塔楼和1栋63层塔楼,2栋塔楼通过20~22层钢结构连廊相连形成双塔连体结构,裙楼7层,地下室为3层加1层夹层,最深为19.5m。

* 中建五局科技研发课题:紧邻地铁超深超长地下室混凝土结构防开裂技术研究(GD2024-SZ11)

[作者简介] 王晓冬,高级工程师,国家一级注册建造师,E-mail:13261110@qq.com

[收稿日期] 2025-06-25



图 1 项目效果

Fig. 1 Rendering of project

本工程主要在南侧和东侧邻近地铁的外墙根据设计要求采用防水自修复混凝土(见图 2 红色部分),混凝土强度等级为 C35,外墙厚度为 600~700mm,南侧与东侧外墙总长度近 370m。3 层地下室及地下 1 层夹层从下到上层高分别为 4.1, 5.45, 5.5, 4.4m。由于建筑结构及地铁使用区域影响,南侧和东侧外墙不同区域呈现出不同的层数及层高,共有 1.5~2.45m, 3.4~4.1m, 4.7~5.65m, 7.75m, 9.15m, 此外墙均采用防水自修复混凝土,为内掺水泥基渗透结晶型防水材料。根据 GB/T 8076—2008《混凝土外加剂》对配制的混凝土进行早期抗裂试验和混凝土裂缝自修复性能试验,本项目采用的渗透结晶型混凝土与基准混凝土相比,单位总开裂面积降低 83%,相对渗水系数为 74.6%,28d 自修复能力比为 157.8%。

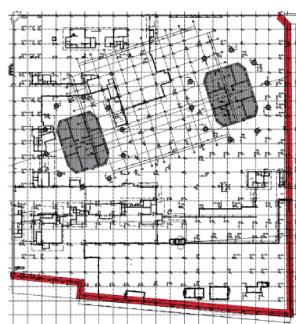


图 2 自修复混凝土外墙范围

Fig. 2 Scope of the self-healing concrete exterior wall

2 防水自修复混凝土浇筑

2.1 原材料

防水自修复混凝土采用 P·O 42.5 水泥进行配制,其核心功能组分为内掺的水泥基渗透结晶型防水材料。混凝土的设计配合比为水:水泥:中砂:碎石:减水剂:膨胀剂:防水密实剂:粉煤灰 = 0.53 : 1 : 2.43 : 3.43 : 0.025 : 0.11 : 0.003 :

0.27。基于此配合比,每 m³ 混凝土中各项原材料的具体用量为:水 160kg、水泥 300kg、中砂 728kg、粒径为 5~25mm 的碎石 1 030kg、Ⅱ级粉煤灰 80kg、膨胀剂 33kg、防水密实剂(F-511B) 1kg 以及减水剂(FST-6) 7.60kg。该配合比的砂率为 41%,水胶比为 0.40,以此保证混凝土混合物具有良好的工作性能,其坍落度控制在(160±20)mm 范围内,以满足现场的施工要求。

2.2 混凝土浇筑

由于地下室外墙与支护桩间的空间有限,故采用单侧支模对防水自修复混凝土外墙进行施工,如图 3 所示。单侧支模支撑体系由预埋螺栓、I16 立柱、I12 斜撑、牛腿、φ16 拉杆、预埋锁脚螺杆、销轴、横竖楞及模板组成。立柱通过预埋螺栓固定于楼板,斜撑与立柱通过销轴连接,牛腿焊接于斜撑上,斜撑的力通过拉杆传递至外墙反坎并受到楼板支撑,这样形成三角稳固支撑体系。同时随着层高变化可加长立柱及增设斜撑,如 2.45m 以下墙高采用 1 道斜撑,3.4~4.1m 墙高采用 2 道斜撑,4.7~5.65m 墙高采用 3 道斜撑,7.75m 墙高采用 4 道斜撑,9.15m 墙高采用 5 道斜撑。单侧支模区域如图 4 所示,具体层高如图 5 所示。

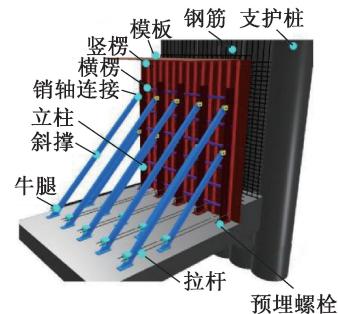


图 3 单侧支模支撑体系

Fig. 3 One-sided formwork support system

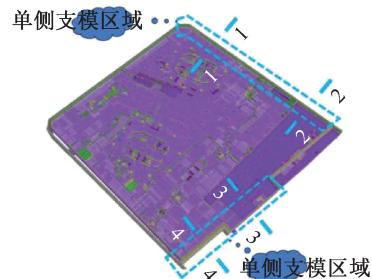


图 4 单侧支模施工区域

Fig. 4 Construction site of the one-sided formwork

地下室根据后浇带划分为 16 个区域(A1~A3, B1~B3, C1~C10),如图 6 所示,其中含防水自修复

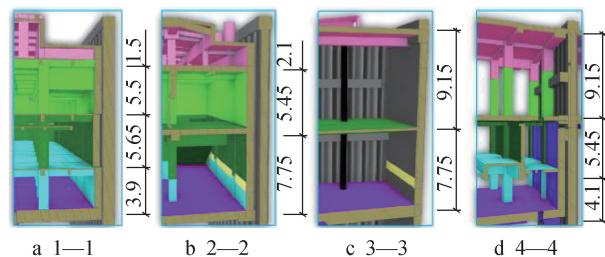


图 5 层高剖面(单位:m)

Fig. 5 Floor height profile (unit:m)

混凝土区域有东侧的 C3, A3, C7 和南侧的 C4, C8, C9, C10。混凝土结构施工在各施工区段内根据进度计划进行流水施工,先后施工交接处需设置施工缝。同时为保证施工质量,先做样板,样板通过验收后进行大面积施工。地下室外墙浇筑前,设置 3mm 厚自粘聚合物改性沥青防水卷材和 1.2mm 厚预铺反粘高分子防水卷材(塑料类)作为防水层,同时外墙预留的 500mm 反坎上设置止水钢板。外墙钢筋绑扎通过验收后,搭设单侧支模支撑体系。单侧支模支撑体系通过验收后,可浇筑防水自修复混凝土。浇筑时采用水平分层且分散下料点的方式进行浇筑,分层厚度为 500mm。下料的同时进行振捣,振捣时保证预埋结构的稳定性。浇筑完成后,防水自修复混凝土终凝后养护≥14d 且达到拆模强度后进行拆模。具体流程:防水层施工→钢筋绑扎→搭设单侧支模支撑体系→防水自修复混凝土浇筑→拆模、材料周转→养护。



图 6 地下室混凝土结构施工分区

Fig. 6 Construction zoning plan for the basement concrete structure

2.3 质量控制

1) 使用 $\phi 18$ 钢筋制作尺杆,保证混凝土的分层浇筑厚度符合要求。

2) 分区浇筑时设置的施工缝在连接时,旧有混凝土表面应凿毛并清除杂物,设置止水钢板,新旧接触面保持湿润不积水,养护 7d 以上。

3) 单侧支模支撑体系的预埋螺栓及预埋锁脚

螺栓用于定位单侧支模位置,必须控制预埋位置的精确度,保证单侧支模不偏离设计位置。

4) 浇筑过程中对于角部及柱边缘的混凝土进行充分振捣。

3 裂缝监测及分析

3.1 典型裂缝

由于施工现场条件复杂,微小且不渗漏的裂缝在地下室空间环境中难以观测,不可作为观测对象。因此考虑到观察、记录和安全对于环境的要求,选择已施工完成的地下 3 层地下室明显的 5 条裂缝作为监测对象,这 5 条裂缝的初始长度均超过 0.5m,利于观测研究,如图 7 所示。L1~L5 裂缝初始长度分别为 57.5, 116.8, 282.6, 140, 179.8cm。

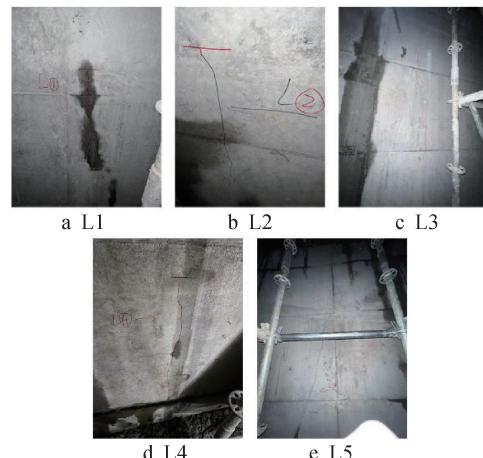


图 7 初始裂缝

Fig. 7 Initial crack

3.2 监测结果

在现场施工情况下,试验对象为体积较大的混凝土外墙结构,无法做到室内试验尺度下的观测方法和精度,故针对现场尺度下防水自修复混凝土裂缝愈合情况的观测指标,选择长度变化更具合理性和适用性。同时根据裂缝长度设置愈合率作为防水自修复混凝土自修复效果的评价指标。愈合率计算公式如下:

$$\delta = \frac{l_o - l_t}{l_o} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ 为愈合率; l_o 为裂缝初始长度; l_t 为裂缝随时间变化长度。

裂缝长度和愈合率随时间的变化如图 8,9 所示。由图 8 可知,随着时间增长,各裂缝长度均降低,且呈现阶梯形降低,各裂缝长度均出现 2 次明显的下降,裂缝 L1~L5 在停止愈合后的长度分别下降了 19.5, 50.8, 130, 51.6, 85.5cm。由图 9 可知,与裂缝长度情况一致的是裂缝的愈合率亦随时间增

加呈阶段性增长,同时可以看出裂缝在停止愈合后仍存在一部分长度,说明防水自修复混凝土在现场施工过程中存在自修复行为,修复程度达33.9%~47.6%,但防水自修复混凝土并不能完全依靠自身达到彻底的无渗漏效果,在防水自修复混凝土自修复的基础上,未修复区域还需配合注浆堵漏措施。

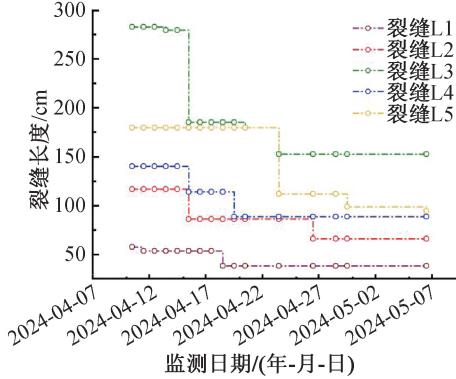


图 8 裂缝长度随时间的变化

Fig. 8 Evolution of crack lengths over time

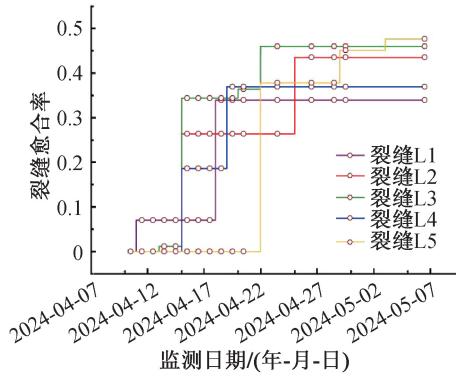


图 9 裂缝愈合率随时间的变化

Fig. 9 Evolution of crack healing rates over time

4 结语

本文基于深超总 C 塔项目,对水泥基渗透结晶型防水自修复混凝土的应用进行了详细叙述,并对地下室外墙的大裂缝进行监测和分析。现场应用表明,裂缝自修复行为呈阶段性,修复程度达33.9%~47.6%,可降低渗漏风险。然而,对于未修复区域还需辅以注浆堵漏措施。

参考文献:

- [1] 冯大阔,肖绪文.装配式混凝土建筑防水技术与措施[J].施工技术(中英文),2024,53(17):7-14,66.
- FENG D K, XIAO X W. Waterproofing technologies and measures of prefabricated concrete buildings[J]. Construction technology, 2024, 53(17): 7-14, 66.
- [2] 令狐延,廖孟哲,高迎衡.地下结构工程渗漏综合防治技术[J].施工技术(中英文),2023,52(14):94-98.

LINGHU Y, LIAO M Z, GAO Y X. Comprehensive prevention and treatment technology of underground structural engineering leakage[J]. Construction technology, 2023, 52(14): 94-98.

- [3] 孙大会,赵国庆,元强,等.纳米改性水泥基渗透结晶材料提高混凝土防水性能研究[J].新型建筑材料,2023,50(8):127-130,144.
- SUN D H, ZHAO G Q, YUAN Q, et al. Study on waterproofing performance of concrete with N-CCCW coating[J]. New building materials, 2023, 50(8): 127-130, 144.
- [4] 逢锦伟.渗透结晶型混凝土裂缝自修复材料试验研究[J].隧道建设,2015,35(S2):32-36.
- PANG J W. Experimental study on permeable crystalline concrete crack self-repairing material [J]. Tunnel construction, 2015, 35 (S2): 32-36.
- [5] 杨敏毅,曾俊杰,王胜年,等.渗透结晶材料对混凝土裂缝自愈合的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (10): 3542-3547, 3554.
- YANG M Y, ZENG J J, WANG S N, et al. Influence of permeable crystallization material on concrete crack self-healing[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(10): 3542-3547, 3554.
- [6] 姚嘉诚,延永东,徐鹏飞,等.水泥基渗透结晶型防水材料和纳米二氧化硅改性混凝土自修复性能的研究[J].硅酸盐通报,2020,39(6):1772-1777.
- YAO J C, YAN Y D, XU P F, et al. Self-healing properties of concrete modified by cementitious capillary crystalline waterproofing and Nano-silica [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2020, 39(6): 1772-1777.
- [7] 王玉峰,李伟,张亚晴,等.内掺水泥基渗透结晶型防水材料混凝土配合比设计及性能研究[J].新型建筑材料,2024,51(4):120-123.
- WANG Y F, LI W, ZHANG Y Q, et al. Study on the design ratio and properties of concrete with cement-based permeable crystalline waterproof material[J]. New building materials, 2024, 51(4):120-123.
- [8] 丁向群,邢进,刘东涛.内掺渗透结晶防水材料混凝土的渗透性能研究[J].混凝土,2016(9):120-123.
- DING X Q, XING J, LIU D T. Study on the permeability of concrete mixed capillary crystalline waterproof materials[J]. Concrete, 2016(9): 120-123.
- [9] 任广毅,王正君,刘中坤,等.内掺水泥基渗透结晶型材料混凝土力学性能试验研究[J].混凝土,2022(2):159-161,166.
- REN G Y, WANG Z J, LIU Z K, et al. Research on mechanical properties of concrete with permeable cementitious capillary crystalline waterproof material [J]. Concrete, 2022 (2): 159-161, 166.
- [10] 李冰,郭荣鑫,万夫雄,等.内掺渗透结晶型防水材料混凝土自愈性能研究[J].非金属矿,2019,42(1):37-39.
- LI B, GUO R X, WAN F X, et al. Research on self healing performance of concrete with permeable crystalline waterproof material[J]. Non-metallic mines, 2019, 42(1): 37-39.
- [11] 胡洋,刁龙,邓鑫,等.渗透结晶型防水剂对水泥基材料自修复性能的影响及其机理研究[J].混凝土与水泥制品,2018(10):1-4.

(下转第 126 页)

- [8] 李航,刘朵,王阳春,等.承插式连接预制拼装桥墩抗震性能试验研究[J].桥梁建设,2024,54(1):95-102.
- LI H, LIU D, WANG Y C, et al. Experimental study on seismic performance of precast piers with socket connection [J]. Bridge construction, 2024, 54(1) : 95-102.
- [9] ZHANG G D, SU S B, HAN Q, et al. Experimental and numerical investigation of seismic performance of prefabricated double-column piers used in accelerated bridge construction [J]. Engineering structures, 2023, 293 : 116688.
- [10] 蓝亦辉,夏樟华,陈浩冲,等.灌浆波纹管装配式桥墩双向地震损伤评价方法[J].世界地震工程,2022,38(4):167-177.
- LAN Y H, XIA Z H, CHEN H C, et al. Bidirectional seismic damage evaluation method for corrugated duct grouting prefabricated bridge piers [J]. World earthquake engineering, 2022, 38(4) : 167-177.
- [11] 许劲,朱祖科,夏樟华.轴压比对灌浆波纹管连接预制拼装桥墩抗震性能的影响[J].福州大学学报(自然科学版),2022,50(4):521-529.
- XU J, ZHU Z K, XIA Z H. Influence of axial pressure ratio on the seismic performance of prefabricated assembled piers connected by grouted bellows [J]. Journal of Fuzhou University (natural science edition), 2022, 50(4) : 521-529.
- [12] 胡志坚,闫明辉,周知,等.不同连接构造的预制拼装桥墩地震响应分析[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(9):55-64.
- HU Z J, YAN M H, ZHOU Z, et al. Seismic response analysis of precast pier with different connection structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9) : 55-64.
- [13] 邵淑营.灌浆波纹管连接装配式桥墩抗震性能研究[D].福州:福州大学,2018.
- SHAO S Y. Anti-seismic performance study of precast bridge piers connected with grouting corrugated pipe [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [14] SHEN Y, WANG Y, FU C X, et al. Seismic performance of precast bridge columns with new grouted corrugated duct connections [J]. Engineering structures, 2025, 327 : 119608.
- [15] 石岩,李军,秦洪果,等.桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J].中国公路学报,2021,34(2):134-154.
- SHI Y, LI J, QIN H G, et al. Review on seismic performance of bridge double-column bents [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(2) : 134-154.
- [16] 孙熠.桥梁双柱及三柱墩抗震性能分析[D].廊坊:防灾科技学院,2022.
- SUN Y. Analysis on seismic performance of double-column and three-column bridge piers [D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2022.
- [17] 卓卫东,曾武华.矩形 RC 桥墩变形能力概率模型[J].工程力学,2015,32(1):57-63,71.
- ZHUO W D, ZENG W H. Probabilistic deformation capacity model for rectangular RC bridge columns [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(1) : 57-63, 71.
- [18] 冉隆飞.双柱式桥墩横向加固易损性分析[J].施工技术(中英文),2025,54(11):118-123.
- RAN L F. Fragility analysis of transverse seismic reinforcement of double-column piers bridge [J]. Construction technology, 2025, 54(11) : 118-123.
- [19] 高博,杨建荣,李睿.高烈度山区机场高架桥墩抗震性能试验研究[J].施工技术(中英文),2024,53(11):1-8.
- GAO B, YANG J R, LI R. Experimental study on seismic performance of airport viaduct piers in high intensity mountain areas [J]. Construction technology, 2024, 53(11) : 1-8.

(上接第 78 页)

- HU Y, DIAO L, DENG X, et al. The influence of cementitious capillary crystalline waterproofing admixtures on the self-healing performance of cementitious materials and its mechanism research [J]. China concrete and cement products, 2018(10) : 1-4.
- [12] 文高原,尹光福,蔡庆华,等.自修复渗透结晶型防水材料对混凝土碱集料反应的影响研究[J].防护工程,2012,34(1):27-30.
- WEN G Y, YIN G F, CAI Q H, et al. Research on the effects of self-healing capillary crystalline waterproofing materials on alkali-aggregate reaction [J]. Protective engineering, 2012, 34 (1) : 27-30.
- [13] 李冰,郭荣鑫,万夫雄,等.不同条件下内掺水泥基渗透结晶

- 型防水材料混凝土自愈合性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7) : 2208-2212.
- LI B, GUO R X, WAN F X, et al. Research on self-healing performance of concrete with cement-based permeable crystalline waterproof material under different conditions [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019, 38(7) : 2208-2212.
- [14] 杜英欣,马再禹,任广毅,等.水泥基渗透结晶型材料与纳米材料对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024(3) : 36-38.
- DU Y X, MA Z Y, REN G Y, et al. Influence of cement based permeable crystalline materials and nano-materials on the properties of concrete [J]. China concrete and cement products, 2024(3) : 36-38.